



CIRAD-Forêt

IDEFOR

Département Forestier

**Bingerville - ABIDJAN - Anguédédou
République de Côte d'Ivoire**

FORMATION A LA VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

En collaboration avec le

**PÔLE REGIONAL AFRICAIN
DE THERMOCHIMIE**



Ademe



IEPF



LES VOIES THERMOCHIMIQUES CLASSIQUES

Philippe Girard

Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement,
Montpellier, France.

1 - INTRODUCTION

La figure 1 présente les grandes voies de valorisations énergétiques de la **biomasse lignocellulosique** qui seule ici, nous intéresse et nous présenterons sommairement les deux principales voies de transformation biochimique : la fermentation anaérobie et l'hydrolyse.

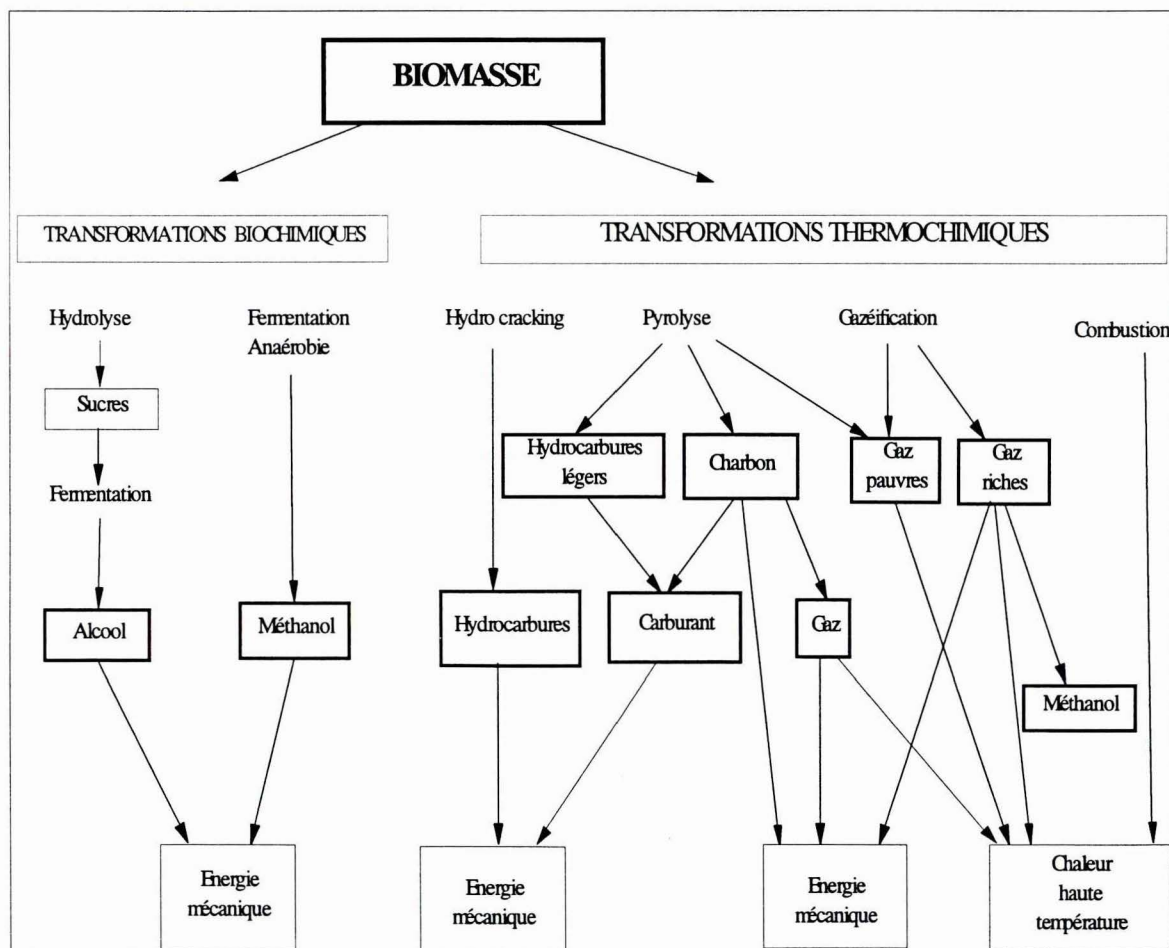


Figure 1 : Différentes voies de valorisation de la biomasse lignocellulosique

1.1 - LA FERMENTATION ANAEROBIE

Ou encore méthanisation est en fait envisagée comme la transposition à l'échelle industrielle de la conversion qui se fait naturellement dans les écosystèmes anaérobies (PELLIZZI, 1980). C'est un processus complexe, succession de réactions biochimiques permettant la transformation de la matière organique en méthane et en gaz carbonique, en passant par divers intermédiaires. Certaines molécules organiques sont réfractaires à la méthanisation, c'est le cas de la lignine. La composition de la matière organique et sa richesse en lignine jouent un rôle limitant dans l'importance relative des différentes étapes de la fermentation méthanique et donc dans le rendement final de la transformation. La teneur en eau du milieu est aussi un facteur important favorisant le bon contact entre le substrat et les micro-organismes. Les espoirs fondés sur les possibilités technologiques de mettre en oeuvre ce processus naturel ont été vite déçus et le passage au niveau industriel n'a pas toujours pu s'adapter aux conditions d'une saine gestion des investissements et d'une vision économique de leur rentabilité.

1.2 - L'HYDROLYSE

Est destinée à réduire en éléments simples fermentescibles, la structure complexe des substances lignocellulosiques pour la production d'alcool. Elle peut être réalisée par voie acide afin de libérer des sucres en C₅. Une hydrolyse acide ménagée est suivie d'une hydrolyse acide totale à 150-180°C (procédé Meunier-Scholler, Bergins) afin de rendre économique le procédé en portant le taux de conversion des sucres de 50% à 80%. Après hydrolyse acide totale de la cellulose en glucose, une fermentation éthanolique ou acétano-butylique est réalisée. Des travaux ont également été menés sur des procédés basés sur une hydrolyse enzymatique. Ces filières visent la production de biocarburants de substitution. Elles ont du mal à se justifier au niveau économique vis à vis de filières plus conventionnelles de fermentation de substances glucidiques (enjeux micro et macro-économiques notamment au niveau des politiques agricoles des pays industrialisés) mais surtout, vis à vis des filières conventionnelles de fabrication d'alcools de synthèse.

2 - LES VOIES THERMOCHIMIQUES

2.1 - LES MECANISMES

La conversion thermochimique de la biomasse fait référence à un ensemble de processus qui interviennent sous l'action de la chaleur et qui produisent des changements de nature chimique des composés constituant les produits d'origine. On les répartit en quatre grandes classes de réactions. Il s'agit de : la pyrolyse, la combustion, la gazéification, la thermolyse.

En schématisant à l'extrême, les réactions thermochimiques résultent de l'application plus ou moins sévère de conditions de températures en milieu plus ou moins oxydant. A l'un des extrêmes, sous l'action de basses températures (100 à ~ 500°C) et en l'absence d'oxygène, la biomasse est fractionnée en charbon, goudrons et produits gazeux. A l'autre extrême (températures > 1000°C), à haute température et en excès d'oxygène, ces composés primaires sont complètement oxydés en gaz.

Ces transformations qui modifient profondément la nature du produit initial font appel à trois grands types de mécanismes chimiques :

- **la pyrolyse**, caractérisée par l'absence d'oxygène,
- **la conversion oxydante** faisant intervenir un gaz qui oxyde plus ou moins complètement la matière première,
- **la thermolyse ou hydroliquéfaction** des hydrates de carbone pour obtenir des huiles.

Les procédés industriels qui en découlent, permettront la production différenciée de chaleur, de carburants ou de combustibles en fonction de l'objectif recherché. Il convient de signaler que ces procédés peuvent faire appel simultanément à deux types de réactions (gazéification puis combustion) et que, en outre, la nature physique de la biomasse matière première peut avoir des répercussions importantes sur les mécanismes réactionnels. Nous le verrons succinctement dans les paragraphes relatifs à chacun des grands types de réactions.

2.2 - LA PYROLYSE

En l'absence de produits oxydants et sous l'action de la chaleur, la biomasse se décompose en trois phases dont l'importance relative varie suivant les conditions opératoires :

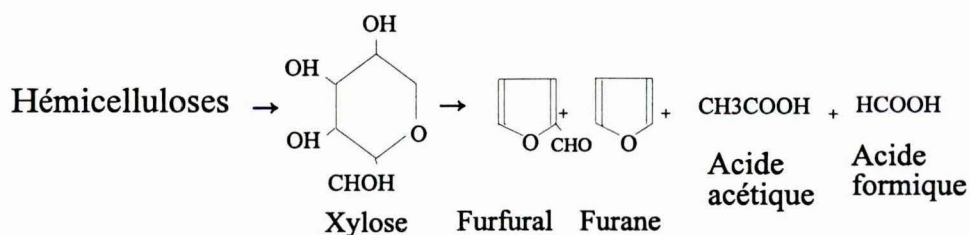
- **une fraction gazeuse** non condensable,
- **une fraction liquide** séparée en deux phases, une phase aqueuse, communément appelée pyroligneux et une phase lourde, les goudrons,
- **un résidu solide**, le charbon principalement constitué de carbone.

L'intérêt de la pyrolyse réside dans le fait que des déchets solides, dont la manutention et le transport (sur longue distance) sont difficiles et coûteux, peuvent être convertis en produits, solides ou liquides énergétiquement concentrés, dont l'utilisation ultérieure est grandement facilitée, les gaz produits pouvant alimenter le processus. La pyrolyse constitue par ailleurs la première étape du processus réactionnel thermochimique, quelque soit l'option technologique retenue.

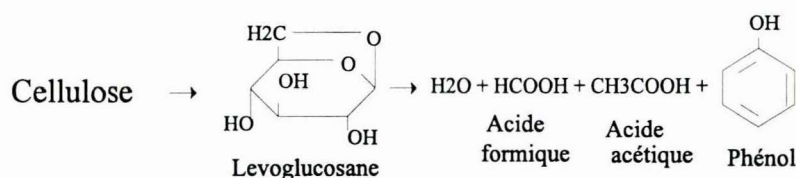
Suivant les conditions opératoires et les conditions de transfert thermique, on distingue deux grands types de pyrolyse (DEGLISE X. et MAGNE P., 1987) :

- une pyrolyse lente souvent associée également à de basses températures ($< 500^{\circ}\text{C}$), et favorisant la fraction solide et liquide,
- une pyrolyse rapide favorisant la production de liquides à basse température ($< 600^{\circ}\text{C}$), ou de gaz à haute température ($> 1000^{\circ}\text{C}$).

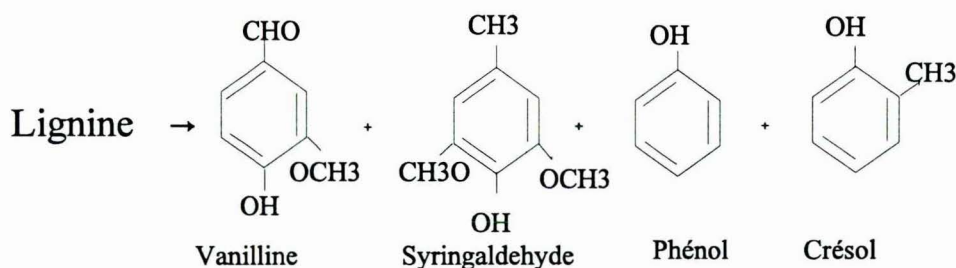
Quelque soit le mode opératoire retenu, les constituants de la matière première (cellulose, hémicelluloses et lignine) vont jouer un rôle au niveau de la formation des produits de la pyrolyse. Ainsi les hémicelluloses se dégradent à la température la plus basse, moins de 350°C (JAYET P.A., 1982). Ce sont elles qui sont à l'origine de l'essentiel des acides acétique et formique élaborés lors de la pyrolyse.



La cellulose dont on connaît le mieux le processus de dégradation pyrolytique, grâce à des travaux anglo-saxons notamment, (SHAFIZADEH F., 1975) est caractérisée par une grande stabilité thermique. Sa décomposition commençant à des températures relativement élevées, les produits de cette décomposition sont relativement plus instables que la cellulose elle-même. Ils évoluent alors rapidement par de nombreux chemins réactionnels et donnent naissance aux mélanges très complexes que l'on observe dans les pyroligneux. Le même auteur propose un schéma de dégradation de la cellulose en trois étapes : initiation, avec formation de radicaux libres sous l'action de la chaleur; propagation de la réaction puis formation des produits de pyrolyse par oxydation et décomposition de ces radicaux (SHAFIZADEH F., 1981).



La décomposition des lignines est, quant à elle, encore mal connue par suite notamment de l'impossibilité de l'isoler à l'état pur. Elle intervient à haute température (elle est encore incomplète à 500°C (PETROFF G., et DOAT J., 1978)). Les produits phénoliques étant absents des pyroligneux de cellulose pure et des hémicelluloses, la lignine est donc à leur origine dans le processus pyrolytique.



La lignine est en grande partie à l'origine du charbon (SHAFIZADEH F., 1975).

2.2.1 - Les produits de pyrolyse

La pyrolyse de la biomasse peut être utilisée pour produire un large spectre de produits. La connaissance des produits de pyrolyse est importante pour l'appréhension des utilisations énergétiques qui pourront être possibles.

2.2.1.1 - La fraction gazeuse

Les gaz obtenus ainsi que leur concentration relative varient dans de fortes proportions en fonction des modes opératoires et de la température finale atteinte. Les caractéristiques des gaz obtenus par certains auteurs sont données dans le tableau 1.

Mode opératoire et température	Gaz en % sur le poids de la matière ayant réagit				
	CO ₂	CO	H ₂	ALCANES	TOTAL
Pyrolyse lente atmosphérique Bois sec 500 °C	11	5	Traces	1.1	17,5
Pyrolyse Bois à 6 % d'humidité 540 °C	15,7	7.8	traces	2.7	26
650 °C	15,2	8.3	0.2	4.2	28
760 °C	16,8	10.0	0.5	4.9	32
860 °C	16,9	11.6	0.8	5.6	35
Pyrolyse avec vide initial Bois anhydre 900 °C	1.6	10.6	0.3	2.2	14,7
Bois humide (50 %) 900 °C	10.2	42.3	0.9	9.5	62,9

Tableau 1 : Analyse de la fraction gazeuse obtenue par pyrolyse du bois (DOAT J. et PETROFF G.,1975)(KNIGHT J.A. ,1976) (DEGLISE X. ,1980)

On constate que, outre les conditions opératoires, les caractéristiques de la matière première influencent la réaction. Ainsi, l'importance de la seule présence d'eau a été démontrée (DEGLISE X. *et al.* ,1980). Elle conduit à une gazéification partielle de la biomasse comme agent oxydant, favorisant la production de gaz.

2.2.1.2 - La phase liquide

On distingue généralement **deux phases** dans la fraction condensable :

- **une phase aqueuse** contenant les produits volatils les plus légers en solution dans l'eau de constitution du bois et l'eau de formation. Cette phase est fortement chargée en acides organiques, alcools et autres produits volatils (VERGNET A.M.,VILLENEUVE F.,1983). La nature de ces produits est aujourd'hui bien connue.
- **une phase organique** plus lourde : les goudrons formés de produits moins volatils (phénols, crésols, furfural, etc).

L'analyse de la composition exacte de la phase liquide obtenue lors de pyrolyses lentes a fait l'objet de nombreuses recherches qui ont permis l'identification de familles de composés bien particuliers (VERGNET A.M., VILLENEUVE F., 1983), (BEAUMONT O., 1981) :

- hydrocarbures linéaires saturés et insaturés,
- hydrocarbures aromatiques polycondensés,
- cétone et lactone cycliques,
- composés phénoliques substitués,
- composés furfuriliques,
- bases azotés.

Les travaux réalisés (ESSAYEGH M., 1988) ont ainsi permis d'identifier plus de 400 composés dans les goudrons de pyrolyse lente atmosphérique. Quelques caractéristiques générales de la phase liquide obtenue lors de la mise en oeuvre de technologies européennes à plus ou moins 500°C, sont résumées dans le tableau 2 (BRIDGWATER A.V., 1988).

TYPE DE REACTION	LENTE (%)	RAPIDE (%)	FLASH (%)
Température °C	500	480	510
Rdt sur produit sec:			
gaz	32	-	10
liquide (hors eau)	21	51	66
eau	26	29	10
charbon	21	20	14
Caractéristiques des liquides			
eau	14,6	17	18
viscosité, 40 °C	300	220	40
densité, g/cm ³	1,20	1,26	1,19
pH	2,0	-	2,4
PCI, MJ/kg produit brut	26,3	18,3	16,3
PCI, MJ/kg produit sec	-	22,1	-
Analyse élémentaire sur sec			
C	61,9	52,2	54,7
H	6,0	6,3	6,4
O	29,5	41,5	38,9
ratio C/H	10,3	8,3	8,5
ratio O/C	0,47	0,79	0,71

Tableau 2 : Caractéristiques des liquides de pyrolyse en fonction des modes opératoires

2.2.1.3 - La fraction solide

Le résidu solide lors de la pyrolyse est communément appelé **charbon**. Ce dernier voit sa composition en carbone s'enrichir lorsque la température de pyrolyse augmente. Corrélativement sa concentration en matières volatiles diminue jusqu'aux environs de 800 °C (cf figure 2). Quand

la production de charbon est optimisée, les rendements matière sur sec varient entre 30 et 35% (RICHARD G.I et ANTAL M.J., 1992) (SHAH N. et al., 1989) ce qui peut être obtenu traditionnellement lors de la carbonisation à relativement faible température et des temps de séjour long mesurés en heures, voire en jours. Les charbons sont toujours recherchés à cause de la diversité de leurs usages potentiels liés pour une part à leur bonne réactivité chimique et à leur grande pureté comparativement à d'autres combustibles.

2.2.2 - Les facteurs influençant les réactions de pyrolyse

Si l'ensemble des mécanismes fondamentaux de dégradation des constituants élémentaires de la biomasse et, à plus forte raison, de la biomasse elle-même est encore mal connu, l'influence de certains facteurs caractérisant le milieu de réaction sur les produits obtenus et les cinétiques des réactions est déjà correctement appréhendée.

2.2.2.1 - La température

Parmi les différents facteurs influençant la réaction de pyrolyse, la température revêt une importance toute particulière. Elle est caractérisée par son évolution au cours du temps, la température maximale atteinte.

Le mode de transfert de chaleur qui peut se faire de façon variée a, quant à lui, des répercussions technologiques importantes. Si la pyrolyse lente à basse température a été depuis très longtemps utilisée pour la production de charbon de bois, les connaissances plus récentes sur les mécanismes réactionnels, ont suggéré différents travaux afin d'orienter la réaction pour favoriser la production de gaz ou de liquide. Ce qui a été permis en jouant sur la vitesse de montée en température et la température finale atteinte. Ainsi, une vitesse de montée en température élevée (1 000 °C/s), à des températures inférieures à 650 °C, associée à une évacuation rapide des produits, favorise la production de liquides. A des températures plus élevées (> 650°C), les produits majoritairement formés sont les gaz. Ces vitesses élevées de montée en température défavorisent la production de charbon. Le tableau 3 résume les grands principes de réaction pyrolytique.

	TEMPS DE SEJOUR	MONTEE EN TEMPERATURE	TEMP. MAX. °C	PRODUITS MAJORITAIRES
La pyrolyse lente Carbonisation Laboratoire	heures 5 à 30 mn	très lente lente	400 à 500 600	solide gaz, liquide, solide
La pyrolyse rapide Fast	0.5 à 5 s	relativement rapide	650	liquide
Flash-liquide	< 1 s	rapide	< 650	liquide
Flash-gaz	< 1 s	rapide	> 650	gaz
Ultra	< 0.5 s	très rapide	1 000	gaz

Tableau 3 : Produits majoritaires de la pyrolyse en fonction de la technologie

2.2.2.2 - La pression

La pression a également une influence sur les produits formés. Ainsi la pyrolyse sous pression 8-10 bars (RICHARD G.I et ANTAL M.J., 1992) favorise la formation de solides sous des conditions de pyrolyse conventionnelle c'est à dire de type cornue (vitesse de montée en température lente, température inférieure à 650°C). La pyrolyse sous vide favoriserait la production de liquide (SHAFIZADEH F., 1975).

2.2.2.3 - Les caractéristiques physiques de la matière première

L'environnement caractérisant le milieu de réaction influe sur les réactions chimiques mises en oeuvre. La constitution, nous l'avons dit, mais aussi la granulométrie et la texture de la matière première lignocellulosique vont donc avoir un rôle important. Ainsi un produit pulvérulent autorisera des réactions de pyrolyse flash que des sciures ne permettront déjà plus (mauvais transferts thermiques). Les produits obtenus, notamment dans la partie gazeuse, s'en trouveront donc sensiblement modifiés.

La présence d'eau sous forme d'humidité de la matière première, si l'on exclut son impact sur le bilan énergétique de la conversion, ne joue aucun rôle à basse température (JAYET P., 1982). A haute température (900°C), elle joue un rôle d'oxydant, favorisant la gazéification, mais son rôle semble en réalité plutôt physique que chimique (DEGLISE X. *et al*, 1980) (voir tableau 2).

2.2.3 - Vocation des produits de pyrolyse

2.2.3.1 - Les produits liquides

La phase condensable peut-être considérée comme un hydrocarbure fortement oxygéné et contenant une proportion d'eau élevée provenant non seulement du combustible d'origine mais aussi des réactions mises en oeuvre. Elle présente également une fraction solide en proportion significative (entraînement de particules charbon). Ces caractéristiques en font un ensemble assez instable sur le plan chimique comme physique. Cette phase peut-être immédiatement utilisée en combustion mais des précautions doivent être prises au niveau de la manutention et du stockage. Sa combustion directe nécessite en outre quelques adaptations de technologie (les technologies classiques développées pour les fuels ne peuvent pas être utilisées directement).

L'eau contenue dans cette phase est particulièrement importante puisqu'elle affecte les possibilités de valorisation de plusieurs manières :

- réduction de la valeur énergétique,
- influence sur le pH et la stabilité des produits,
- augmentation de la viscosité,
- augmentation des problèmes d'environnement en cas de tentative de réduction de la quantité d'eau (traitement des effluents).

La séparation de l'eau de la fraction aqueuse s'est pour l'instant heurtée à de nombreux problèmes techniques. Ainsi le séchage à basse température comme l'évaporation ont entraîné des détériorations de qualité physique et chimique du liquide.

Ces produits liquides, encore appelé huiles, peuvent subir des traitements secondaires de type coupe pétrolière afin d'améliorer leur qualité (hydrotraitement catalytique poussé afin d'obtenir une désoxygénation complète des huiles de pyrolyse (LAURENT E. et DELMON B., 1992)), et permettre la production d'un carburant. Les conditions opératoires sont sévères, et la consommation d'hydrogène importante: 300 à 700 Nm³/t (BRIDGWATER A.V., 1992). On obtient une essence brute, mélange de naphta et de distillats moyens. Des travaux sont en cours dans l'Union Européenne (programme JOULE) et en Amérique du Nord. Plusieurs installations de pyrolyse flash existent (BRIDGWATER A.V., 1992), mais l'impact des conditions opératoires sur la composition des huiles doit encore être approfondi. Une valorisation chimique par distillation pour séparer certains composés à forte valeur ajoutée peut être envisagée c'est le cas actuellement au niveau industriel en France (ATOCHM, 1988).

2.2.3.2 - Les gaz

Les gaz de pyrolyses ont généralement un assez faible pouvoir calorifique (4-8 MJ/Nm³) dépendant des conditions opératoires. Ces gaz, de composition assez variée, n'ont pas d'autre utilisation possible que d'être brûlés pour satisfaire les besoins énergétiques du procédé de pyrolyse, sécher la matière première, etc.

Dans le cas de la pyrolyse lente, pour la production de charbon de bois, les gaz de carbonisation représentent jusqu'à 50% de l'énergie contenue dans le bois et sont une source de pollution non négligeable, qu'en tout état de cause les nouvelles réglementations, notamment au niveau européen, ne peuvent plus tolérer.

Cette situation a conduit le CIRAD à développer un protocole de mesure et de contrôle de la qualité des gaz de pyrolyse afin de pouvoir les caractériser et d'envisager différentes solutions de valorisation. La figure 2 présente la courbe d'évolution du PCI en fonction de la durée de cycle de carbonisation. Des travaux menés en collaboration avec des industriels ont permis le développement de nouveaux procédés basés notamment sur l'incinération des fumées avec récupération de la chaleur pour le séchage préalable du bois avant la carbonisation. Les principaux résultats seront développés ultérieurement.

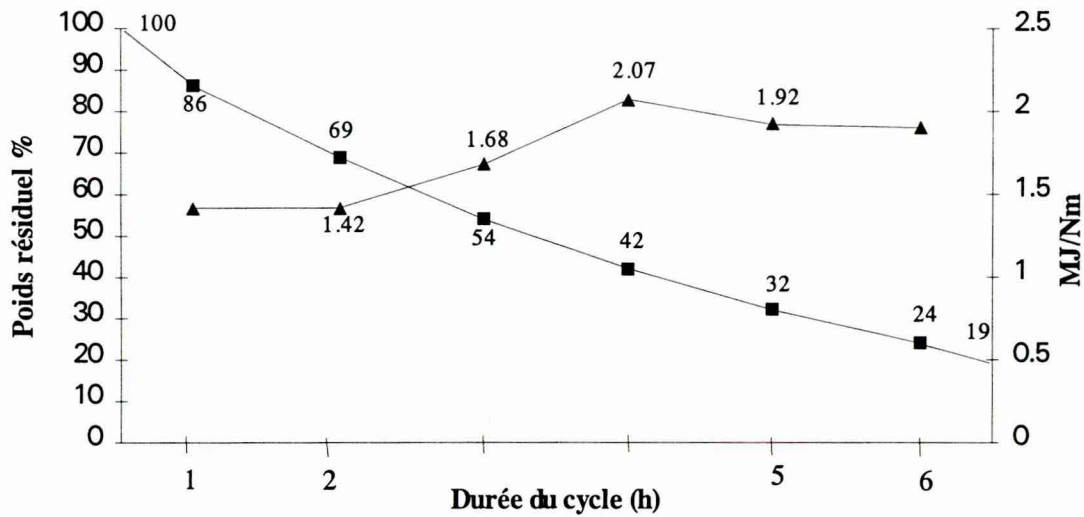


Figure 2 : Pouvoir calorifique des effluents et perte de masse en fonction de la durée du cycle de carbonisation des fours à combustion partielle (SHAH N., 1990).

2.2.3.3 - Le charbon

Lorsque la pyrolyse est optimisée pour la production de charbon, les rendements peuvent varier de 20 à 40 % sur la matière première anhydre. C'est ce qui est obtenu dans le cas de la carbonisation lente à moyenne température (450 °C), dans la quasi majorité des procédés industriels actuellement opérationnels de cette filière technologique. Dans ce cas de figure, gaz et pyrolygneux produits doivent être valorisés ce qui permet en outre d'éviter tout problème de pollution. Cette production de charbon dont l'origine remonte à l'antiquité reste très importante au niveau mondial tant pour les PED que pour les pays industrialisés du fait de la très grande qualité de ce produit qui se prête à de multiples usages : combustible domestique, activation, électrometallurgie, sidérurgie, etc.

2.2.4 - Etat de la technique

2.2.4.1 - La production de charbon de bois

Les techniques et les matériels développés pour la production de charbon de bois sont connus depuis de très nombreuses années. Malgré l'apparition de nouveaux matériaux, ils n'ont pas fondamentalement évolué depuis l'Antiquité du fait des utilisations généralement plutôt artisanales du charbon de bois, qui ne sont donc pas compatibles avec des coûts élevés d'investissements.

On distingue trois modes opératoires de carbonisation :

- la carbonisation par combustion partielle : l'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par la combustion d'une partie de la charge,

- la carbonisation par chauffage externe : l'énergie nécessaire est fournie à la charge par un foyer de chauffage externe, par l'intermédiaire d'une surface d'échange,
- la carbonisation par contact de gaz chauds : l'énergie est fournie par la mise en contact direct de la charge et d'un gaz chaud provenant d'un foyer externe.

L'essentiel de la production de charbon de bois est le fait de techniques artisanales reposant sur le premier principe, notamment dans les pays tropicaux.

2.2.4.2 - *La production d'huile*

Ces dernières années en Europe, seul deux installations industrielles reposant sur un procédé conventionnel de pyrolyse de grande capacité étaient opérationnelles en France et en Allemagne pour la production conjuguée de charbon et d'huile. Les principaux résultats sur des installations de pyrolyse éclair sont nord américains. Les canadiens d'ENSYN commercialisent un procédé de capacité en huile allant jusqu'à 4 t/h, dont deux unités pilotes sont en cours d'expérimentation en Espagne (UNION FENOSA), et en Italie (ENEL). Ce procédé est constitué :

- d'un réacteur dans lequel est introduit la biomasse préalablement conditionnée et séchée. Les particules de biomasse sont alors mises en contact avec du sable chaud en suspension, au niveau duquel se font les réactions de pyrolyse,
- d'une unité de séparation du sable, puis du charbon (cyclone), vers laquelle l'ensemble sable et produits de réaction sont dirigés,
- d'un système de condensation des vapeurs. Le temps de séjour des vapeurs dans le réacteur peut être contrôlé très précisément, quelques centaines de millisecondes.

Les équipements de pyrolyse pour la production d'huiles sont recensés dans le tableau 4.

Organisation	Pays	Procédés	Capacité (kg/h)
Interchem	USA	Ablative	1360
Ensyn Engineering	Canada	Transporté	1050
Fenosa/Waterloo	Espagne/Canada	Lit fluidisé	250
Egemin	Belgique	Lit entraîné	250
Ensyn Engineering	Canada	Transporté	150
Laval University	Canada	Sous vide	50
WWTC	Canada	Four	42
NREL	USA	Ablative	36
CRES	Grèce	Lit circulant	15
Twente University	Hollande	Ablative	10
INETI	Portugal	Lit fluidisé	5
Waterloo University	Canada	Lit fluidisé flash	3
Aston University	UK	Ablative	2
ENEL	Italie	Transporté	650

Tableau 4 : Technologies pour la production d'huiles de pyrolyse au niveau R&D

Il est cependant assez difficile de connaître le niveau réel de leur maturité industrielle. La capacité des installations existantes présentées dans ce tableau montre bien qu'il s'agit d'installations pilotes ou de laboratoire. Les types de réacteur et les modes de fourniture de chauffage en usage reposent sur des principes assez similaires à ceux employés en gazéification. Une gamme de combinaison et de configuration très large a cependant été expérimentée. La pyrolyse éclair reste, en effet, encore loin de la maturité industrielle.

2.3 - LA CONVERSION OXYDANTE

On distinguera deux grands types de conversions : la gazéification qui est une oxydation partielle des produits de base par un gaz ou un mélange de gaz oxydant (air, O_2 , H_2O ,) conduisant à un gaz combustible contenant de fortes proportions de CO et d' H_2 : la combustion qui est une oxydation totale du matériau.

2.3.1 - La gazéification

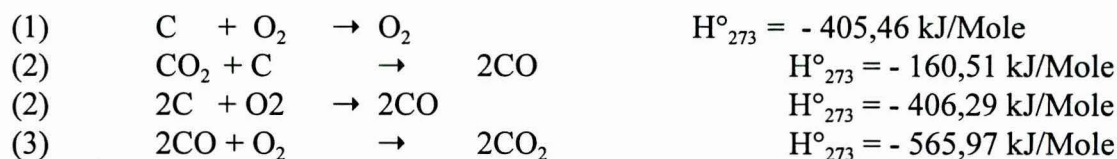
2.3.1.1 - Les réactions de gazéification

Par souci de simplification, on peut décomposer la gazéification en plusieurs étapes. Dans un premier temps se tient une réaction de pyrolyse, comme décrite précédemment, où le chauffage préliminaire de la matière première fournit, en plus des gaz, des corps complexes en quantité variable selon le type de matière première, la durée et l'intensité du chauffage :

Biomasse $\rightarrow CH_4 + CO_2 + H_2 + CO_2 + H_2O + \text{Hydrocarbures lourds} + \text{Charbon}$

Dans un deuxième temps, au contact d'un mélange contenant de l'oxygène, on constate les réactions résumées ci-après :

Réactions du gaz à l'air



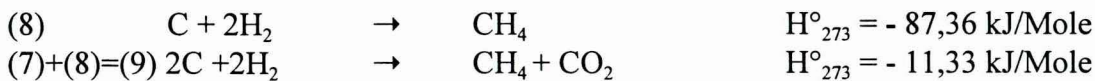
Réaction du gaz à l'eau ("vapogazéification")



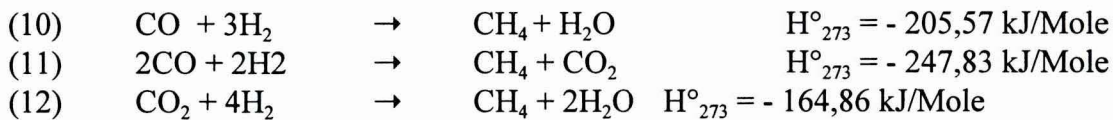
Conversion catalytique



Hydrogazéification



Méthanation catalytique



Ces réactions ont lieu à assez haute température (entre 800 et 1 000 °C) et sont très rapides. Elles sont globalement endothermiques, il faudra donc apporter une quantité importante d'énergie. Le mode d'apport de cette énergie pour couvrir l'ensemble des besoins aura d'importantes implications au niveau des procédés.

Ainsi on distinguera :

- **les procédés auto-thermiques**, lorsque les réactions sont orientées de façon à favoriser globalement les réactions exothermiques qui dégagent une quantité de chaleur suffisante pour couvrir les pertes, y compris la chaleur sensible des gaz. C'est la voie la plus classiquement utilisée. Cette voie conduit à des gaz à moyen pouvoir calorifique contenant principalement CO et H₂ si l'on emploie de l'oxygène. Avec de l'air comme oxydant, on obtient un gaz pauvre dilué par de l'azote (PCS compris entre 5 000 et 10 000 kJ/m³).
- **les procédés allothermiques** lorsqu'un chauffage extérieur au milieu réactionnel est nécessaire pour assurer la gazéification. Le pouvoir calorifique du gaz est alors plus important (>10 000 kJ/m³).

Si l'on admet que la pyrolyse de la biomasse, première étape de la gazéification, donne du gaz, du charbon et des goudrons, tout l'art de la gazéification réside dans l'orientation de la réaction vers la minimalisation de la production des goudrons et la maximalisation de la production de gaz ce qui est obtenu avec des vitesses de chauffe très rapides entre 900 et 1 000°/s (DEGLISE X. et MAGNE P., 1984). Cette vitesse de chauffe dépend du rapport surface/volume de la particule (elle est donc limitée par la vitesse de transfert thermique). L'élimination des goudrons formés, même avec des lits fluidisés, où la taille de la particule est cependant optimisée, complique singulièrement le procédé et accroît considérablement les coûts opératoires lorsqu'elle est techniquement possible (ESPILIN G.J. et al, 1986).

2.3.1.2 - Les produits obtenus

Les différents types de gaz obtenus par gazéification peuvent être classés en trois catégories selon le tableau 5 : les gaz dit pauvres (3,5 à 7 MJ/m³) sont caractérisés par la présence d'azote provenant de l'air . Les gaz à moyen pouvoir calorifique (9 à 15 MJ/m³) sont obtenus soit par gazéification à l'oxygène, soit par procédé à lits fluidisés circulants où les étapes de pyrolyse et de gazéification endothermique sont séparées de l'étape combustion exothermique (procédé Wellman), soit par gazéification à la vapeur : les gaz à haut pouvoir calorifique (20 à 30 MJ/m³)

sont obtenus au niveau du laboratoire par gazéification à l'hydrogène.

(% volumique)	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C _n H _n	N ₂
gaz pauvre	20	24	13	3	1	40
gaz à moyen pouvoir calorifique	26	51	6	13	3	-
gaz à haut pouvoir calorifique	-	-	1	81	4	14

Tableau 5 : Composition moyenne de gaz sec (DEGLISE X. et MAGNE P., 1984)

Les caractéristiques du combustible ont une grande influence sur le taux de conversion, à savoir: humidité, composition élémentaire, taux de matière volatile et de carbone fixe, pouvoir calorifique supérieur et inférieur, caractéristiques physiques, etc, et donc sur la qualité du gaz (BUEKENS A. et SCHOETERS J., 1984).

2.3.1.3 - Les utilisations des gaz

La gazéification permet la conversion de l'énergie contenue dans un solide en énergie d'un gaz combustible (à opposer à la combustion qui convertit totalement l'énergie du solide en chaleur). Cette conversion présente deux avantages par rapport à une oxydation totale du solide :

- la combustion d'un gaz présente des propriétés intéressantes par rapport à celle d'un solide dans la mesure où cette combustion est plus facile à contrôler. Elle nécessite un plus faible excès d'air (pour une bonne combustion), permet une simplification et une réduction de la taille des installations, minimise les émissions polluantes (pas de particules) et les encrassements des échangeurs,
- un gaz peut être utilisé dans des moteurs ou des turbines pour la production de force motrice puis d'électricité, ou entrer dans la synthèse de produits chimiques (ammoniac, méthanol).

On peut classer les débouchés des produits de gazéification en trois catégories :

- **Chaleur** : à partir des filières gaz pauvres, on brûle alors le gaz. Les températures atteintes sont supérieures à celles des fumées de combustion classique de produits végétaux sur grille, ce qui, ajouté au rayonnement de la flamme, permet un meilleur rendement des chaudières. Cela permet d'envisager des gains de place et d'investissement. Cette utilisation est la plus simple et, à l'exception d'un dépoussiérage, ne requiert pas de traitement important des gaz. La gazéification de la biomasse pour des applications chaleur connaît plusieurs réalisations en Europe notamment dans les pays scandinaves pour des applications comprises entre 5 et 35 MWt (BEENACKERS A., 1992).
- **Energie mécanique** : les gaz pauvres produits sont aptes à la combustion dans des moteurs. Le rendement final de la filière gazogène, moteur à gaz est légèrement supérieur à celui de la filière combustion-chaudière/turbine vapeur pour de petites unités (>500 kWe).

L'investissement est donc plus faible. Le problème majeur de mise en oeuvre de cette filière réside dans les caractéristiques de propreté des gaz, dont la quantité de poussières et de goudrons ne devrait pas dépasser respectivement 0.5 à 10 mg/m³ et 100 mg/m³. Spécifications que les systèmes de traitement des gaz ont bien du mal à respecter surtout pour de petites installations (quelques dizaines de kW). Les gaz à moyen pouvoir calorifique peuvent également être utilisés dans des turbines à gaz dont les avantages sont bien connus: bon facteur de charge, faible coût de maintenance, possibilité d'alimentation en gaz chaud favorisant le rendement thermodynamique. La possibilité de valoriser les gaz d'échappement en chaudière (cycle combiné), devrait alors permettre de tirer le meilleur parti des gaz de gazéification. Dans ce cas précis, pour une intégration optimale, la gazéification devra s'effectuer sous pression ce qui complique le processus. Les systèmes intégrant la production d'électricité en cycle combiné, en sont au stade pilote de démonstration avec environ 6 compagnies ayant développé un procédé dont les performances semblent prometteuses (BEENACKERS A., 1992). On espère ainsi améliorer sensiblement les rendements de conversion pour atteindre des rendements en électricité de 38 à 40 % (20 à 25% en filière classique chaudière/turbine). Les installations auraient des tailles unitaires plus grandes (100 Mwe). La plus grande installation pilote actuelle est de 6 MWe + 10 MWth. Le principal verrou technologique concerne l'épuration du gaz en sortie de gazogène pour le rendre acceptable par une turbine à gaz. Les principaux travaux ont lieu en Scandinavie et en Amérique du Nord. Le traitement à chaud par dolomite donne de bons résultats.

- **Chimie** : cette valorisation peut s'envisager sur des gaz à moyen pouvoir calorifique c'est-à-dire via la gazéification à l'oxygène, par exemple, ou à la vapeur, voire même à l'air sous certaines conditions d'opérations et donnant un gaz riche en CO et H₂ qui aujourd'hui même, est la matière première, préparée à partir du cracking du pétrole, de la synthèse du méthanol. La fabrication du méthanol à partir de produits ligneux présente des avantages importants sur celle de l'éthanol à partir de la fermentation alcoolique de jus sucrés. En effet, la quasi totalité de la matière végétale étant gazéifiée, le rendement est très supérieur à celui de la fermentation alcoolique où une partie importante du sucre est oxydée à l'état de gaz carbonique et, de ce fait est perdue. La principale faiblesse de cette filière est qu'elle ne dispose pas actuellement de matériel commercial, les travaux ayant été stoppés ces dernières années, et que pour un prix du baril de pétrole inférieur à 30 \$ US, elle ne passe pas en terme d'économie de marché.

2.3.1.4 - Etat de la technique

En 1984, le recensement des équipements de gazéification avec leur niveau de développement faisait apparaître approximativement une centaine de matériels différents reposant sur deux grandes techniques : les lits fixes et les lits fluidisés. La gamme de capacité allait de quelques kW à 1 MW avec une exception canadienne (Omnifuel Gasification System à 6 MW), l'essentiel des matériels se situant au dessous de 500 kW. En 1997, l'offre s'est considérablement restreinte. Par suite de la baisse de la demande (baisse des cours du pétrole) de nombreux constructeurs ont disparu. Les travaux américains ou européens concernent aujourd'hui de grosses capacités pour la production d'électricité seule. Si chacun de ces matériels présentent des caractéristiques de fonctionnement et des performances sensiblement équivalentes, leur niveau de maturité industrielle est quant à elle très différente.

La gazéification, presque exclusivement envisagée pour la production d'électricité, a suscité de nombreuses études et expérimentations. C'est essentiellement le bois, généralement employé sous la forme de «plaquettes papetières», qui est le combustible de référence et qui convient bien pour les différents procédés de gazéification.

Cette technologie a toutefois du mal à arriver à maturité à la fois pour des raisons économiques car les premières unités ont un coût d'investissement estimé supérieur à 2 500 US\$/kW installé et pour des raisons techniques :

- fiabilité des systèmes de filtration des gaz mal établie,
- corrosion ou dépôt sur les moteurs / turbine mal maîtrisés,
- préparation / manutention / gestion de la matière première difficiles.

Pour des puissances moyennes de quelques MW, le schéma technologique dominant des projets actuellement est la gazéification en lit fluidisé en cycle intégré : gazéifieur - turbine à gaz - récupérateur - turbine à vapeur....

Les entreprises leader dans ce domaine sont finlandaises (Ahlstrom maintenant repris par Foster Wheeler et Tampella / Enviropower repris par Carbona) ou suédoises (Tps). Les deux premières ont réalisé des pilotes (~ 10 t/h) qui ont permis de mener des campagnes d'essais de longue durée sur différents combustibles : bois, tourbe, lignite, charbon.... et Ahlstrom a construit la première unité de démonstration à Varnamo en Suède pour la Compagnie d'Electricité Sydkraft. La taille de l'installation est limitée (6 MWe) et celle-ci conserve un caractère expérimental.

Cette unité est actuellement la seule au monde à fonctionner sur ce principe. Deux ans après sa construction, elle vient de produire en Septembre 96, les premiers kWh électriques après couplage du gazéifieur à la turbine à gaz. Bien que quelques centaines d'heures de fonctionnement aient été cumulées, une longue période de tests est maintenant nécessaire avant d'atteindre un fonctionnement «industriel».

Malgré le soutien apporté depuis plusieurs années de la part d'organismes internationaux comme l'Union Européenne ou la Banque Mondiale et les importantes aides publiques mobilisées, les projets ne se sont pas encore concrétisés et plusieurs d'entre eux sont déjà abandonnés.

Antérieurement au projet de Varnamo, seule une installation de gazéification similaire a été réalisée mais s'est soldée par un échec : le projet Edf en Guyane française de production de 7 MWe à partir d'un lit fluidisé canadien Biosyn / Biodev. Le gaz produit devait alimenter un moteur dual; l'installation a été entièrement construite et n'a jamais été réceptionnée ni pu fonctionner : mauvaise maîtrise de process encore au stade expérimental et une insuffisante épuration des gaz.

Il conviendra de retenir qu'en terme de **systèmes visant la production d'électricité**, on trouve donc deux types d'ensembles :

- gazogène/moteur à combustion interne, dont certains équipements ont atteint un niveau

commercial, mais présentent de grosses contraintes d'utilisation : petite capacité, maintenance importante, coût élevé,

- gazogène/turbine à gaz avec ou sans cycle combiné, qui en sont encore au stade du développement.

Les systèmes visant la production de chaleur ont été quant à eux relativement peu étudiés malgré la multiplicité des applications potentielles en séchage et l'avantage qu'ils peuvent présenter : facilité de gestion, petite capacité répondant bien aux besoins des petites entreprises des PED, bon rendement énergétique. Cette situation a conduit le CIRAD Forêt à développer avec des constructeurs français un ensemble gazogène + brûleur où l'essentiel des travaux ont porté sur l'adaptation d'un brûleur industriel aux caractéristiques du gaz.

2.3.2 - La combustion

L'objectif de la combustion de la biomasse est la production de chaleur. De l'air est fourni au système en quantité suffisante pour permettre l'oxydation totale de la biomasse en gaz permanent et les réactions exothermiques mises en oeuvre lors de la conversion produisent de la chaleur.

2.3.2.1 - Description qualitative sommaire de la réaction

En réalité, la biomasse elle-même ne brûle pas mais ce sont les produits de sa dégradation qui sont combustibles. Ainsi la combustion de la biomasse se fait en trois phases :

- le séchage : tant que l'eau libre subsiste en surface, la température de celle-ci se maintient au voisinage de 100 °C et la biomasse ne peut entamer sa décomposition (ESPILIN G. *et al*, 1986) (LEE C. et DIEHL J., 1981),
- la pyrolyse : produisant du charbon et un gaz qui brûle avec des flammes autour du bois, quand la matière première a été séchée,
- l'oxydation du résidu charbonneux dès que cesse la pyrolyse (plus ou moins 800 °C) et la combustion des produits gazeux.

Les constituants principaux d'un combustible sont le carbone et l'hydrogène. La combustion complète de ces constituants avec l'oxygène de l'air, peut donc être résumée par les réactions principales suivantes :



Si le mélange fourni au système contient la quantité exacte d'oxydant requise pour une réaction complète, la réaction est dite stoechiométrie. Les gaz résultant de cette combustion sont CO₂, H₂O et N₂ avec seulement quelques traces d'autres gaz. Dans ce cas, le volume des produits de combustion est minimal. Ce type de combustion est difficile à réaliser dans la pratique, car il nécessite une parfaite homogénéité du mélange air/gaz qui ne peut être obtenue facilement avec des produits solides (du fait de l'hétérogénéité de la taille de la particule, cinétique de transfert thermique, combustion de résidu charbonneux dont la vitesse de consommation varie en fonction du diamètre de la particule, etc). Aussi, si l'on veut être sûr que tous les combustibles puissent

entrer en contact avec l'agent oxydant, la combustion d'une manière générale et la combustion de la biomasse en particulier, se fait en excès d'air. L'oxygène qui ne sert pas à assurer l'oxydation du combustible se retrouve donc intégralement dans les produits de combustion.

Cependant, en raison de conditions défavorables du milieu réactionnel la combustion peut être incomplète. Cette combustion se caractérise par la présence simultanée d'oxygène et d'imbrûlés (CO , H_2 , Hydrocarbures légers ou lourds,...) dans les produits de combustion.

Ce type de combustion se rencontre lorsque l'air disponible ne se combine pas totalement au combustible dans la zone de combustion. Ce peut être le fait d'une hétérogénéité du combustible, ou d'une température de combustion trop basse, ou d'une dépression trop importante régnant dans l'enceinte, etc. Afin de permettre un bon mélange d'air comburant au niveau de la chambre de combustion, l'alimentation en air se fait à deux niveaux : l'air primaire pour la pyrolyse et la gazéification du combustible dans la zone chaude, l'air secondaire pour l'oxydation des gaz combustibles. Cette séparation est aujourd'hui généralisée, elle permet de minimiser l'excès d'air.

Si de la qualité de l'apport d'air dépend la qualité de la combustion, il est clair que tous les paramètres propres à la pyrolyse vont ainsi influencer la qualité de la combustion dans la première phase du processus et ainsi orienter la phase d'oxydation à proprement parler. Une combustion efficace et propre, cherchera donc à augmenter la volatilisation de la matière première en jouant sur le facteur température/ temps de séjour (THORTON M., 1981).

Le rendement de la conversion et l'impact sur l'environnement sont très liés et seront fonction notamment d'un mélange optimum combustible/air, ce qui aura des répercussions technologiques importantes.

2.3.2.2 - Les produits de combustion

En principe lorsque la combustion est complète, les gaz de combustion formés ne contiennent **que des gaz inertes** (CO_2 , H_2O et azote de l'air). Les réactions en jeu étant exothermiques, le principe des procédés de combustion repose sur la récupération maximum de la chaleur contenue dans ces gaz et le transfert de cette énergie vers un fluide (généralement de l'eau). Plus la température de combustion sera élevée, meilleurs seront les échanges. La composition, notamment le rapport H/C, et la nature du combustible affectent très fortement les performances des technologies de combustion. En effet, les molécules d'eau formées à partir de l'hydrogène ainsi que l'eau de constitution du combustible sont sous forme de vapeur dans les gaz de combustion. La chaleur latente de vaporisation de l'eau est perdue pour le système lorsque cette vapeur n'est pas condensée, ce qui est généralement le cas au niveau industriel.

Les procédés de combustion de la biomasse auront généralement des rendements plus faibles que les matériels utilisant des combustibles conventionnels pour les raisons suivantes :

- hétérogénéité du combustible, mauvais mélange nécessitant un fort excès d'air qui diminue la température des gaz de combustion et augmente leur volume,
- humidité du combustible biomasse qui augmente le volume de fumée et diminue leur température,

- le rapport H/C moins favorable qu'avec certains fuels conventionnels,
- la présence de produits de combustion non dégradés augmentant la température de point de rosée des fumées.

D'autres facteurs vont influencer la qualité de la combustion et le rendement de la conversion:

- la granulométrie et l'homogénéité de la biomasse,
- les systèmes d'alimentation en combustible, moins faciles à maîtriser et à contrôler que pour des combustibles liquides ou gazeux.

2.3.3.3 - Les utilisations

L'originalité de la biomasse combustible est sa combustion en deux temps : dégagement de produits volatils et combustion de ceux-ci, puis combustion du résidu charbonneux. L'air comburant devra donc être admis à deux niveaux :

- l'air primaire traversant la couche du combustible, et destiné à assurer la pyrolyse du bois, la combustion des pyroligneux et du résidu charbonneux,
- l'air secondaire destiné à brûler les gaz issus de la pyrolyse qui n'auraient pas réagi avec l'air primaire. Au niveau technologique cet air doit être le plus chaud possible, et réparti dans la masse de gaz à brûler de façon à assurer un mélange air-gaz le plus intime possible.

Les gaz de combustion sont utilisés en chaudière pour la production d'énergie thermique ou d'énergie mécanique par l'intermédiaire de turbine à vapeur, avec ou sans cogénération.

2.3.2.4 - Etat de la technique

La production de chaleur est la principale forme actuelle de valorisation énergétique de la biomasse au niveau mondial. Ces matériels sont aujourd'hui bien maîtrisés. Ainsi, il y a aux Etats-Unis, 7 000 MWe de capacité installée, dont la moitié en cogénération, principalement depuis la mise en place de la réglementation de 1978 "Public Utilities Regulatory Policies Act" (MEADE W., 1992). Les centrales électriques à bois actuelles, ont des puissances maximales de 50 MWe et des rendements de conversion en électricité inférieurs à 25 %.

Le terme générique chaudière est utilisé pour désigner un générateur de chaleur. C'est pour simplifier, un échangeur conçu pour changer l'eau en vapeur en utilisant une source de chaleur. Cette dernière, en ce qui nous concerne, est constituée des gaz de combustion de la biomasse.

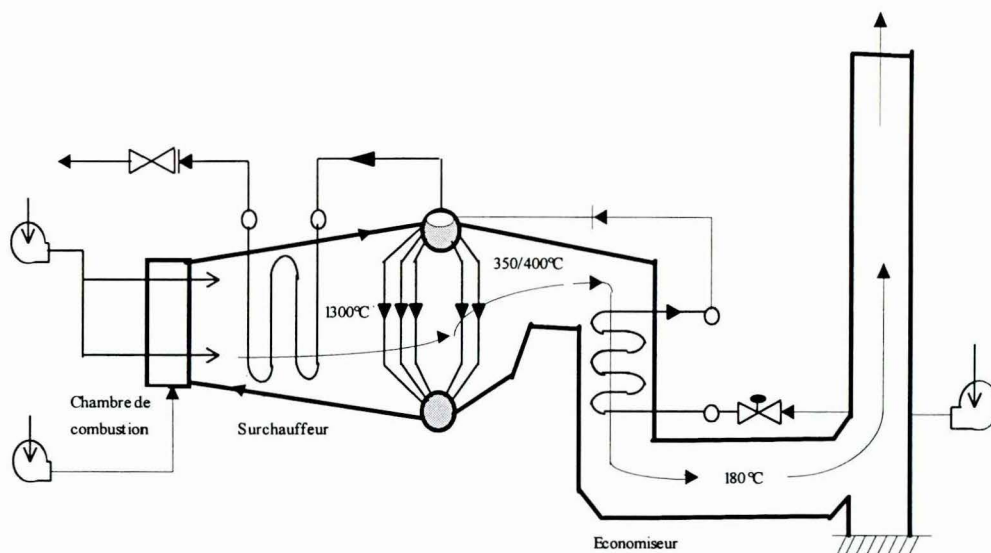
Une chaudière comprend :

- le foyer, zone au niveau duquel s'effectue la combustion,
- la chaudière à proprement parler, où s'effectuent les échanges thermiques.

Une chaudière peut avoir deux utilisations, la production de chaleur pour des processus industriels (cuisson, séchage, ...), et/ou la production d'énergie mécanique puis d'électricité. Outre la vapeur qui est la plus communément recherchée, d'autres fluides peuvent être utilisés; eau

- stockage de l'énergie produite,
- transport de cette énergie jusqu'aux "utilisateurs",
- transfert d'énergie soit direct, soit indirect par contact ou mélange.

- une chambre de combustion où s'effectuent les échanges, principalement par radiation, entre les gaz de combustion et l'eau / la vapeur, 35 à 40 % de la chaleur échangée,
- éventuellement un surchauffeur où les échanges par radiation et convection permettent de surchauffer la vapeur, représentant 10 à 20 % des échanges,
- un faisceau de tubes avec lesquels les échanges se font principalement par convection, constituant 40 à 50 % des échanges,
- un économiseur ou réchauffeur d'eau, où les échanges se font essentiellement par convection due à la chute de température des gaz (400 à 500 °C), les échanges sont de l'ordre de 5 %,
- quelquefois, un réchauffeur d'air est installé pour préchauffer l'air de combustion (particulièrement important pour les combustibles à très forte humidité, mais il ne se justifie que sur de grosses installations).



Les techniques de combustion sont maintenant bien connues et bien maîtrisées même si quelques innovations continuent d'améliorer leur performance. En outre, les marchés des équipements de combustion de la biomasse sont relativement différenciés depuis quelques années dans les pays du nord et les pays tropicaux. Les besoins de chaleur pour le chauffage ont créé de nouveaux marchés pour les équipements thermiques dans les pays du nord alors que la demande en équipements des pays tropicaux est restée traditionnelle et limitée aux secteurs industriels : besoins de vapeur process et d'électricité... (hors foyers domestiques).

Dans les pays du nord, deux secteurs particuliers ont impulsé l'évolution des technologies de la combustion:

- **la réalisation de centrales de chauffage** pour alimenter des réseaux de chaleur urbains ou ruraux ont conduit à mettre en place des dizaines d'installations de quelques centaines de kW (principalement en Autriche) à plusieurs MW en Suède, Finlande, Danemark. Pour les plus grosses installations, ce sont souvent des unités de cogénération qui ont été installées. Plusieurs évolutions techniques sont à remarquer dans ce domaine :
 - . les développements ont porté sur les équipements périphériques permettant de stocker, transférer, alimenter en combustible les chaudières,
 - . les cycles énergétiques sont optimisés et visent à la fois un meilleur contrôle de la combustion (ce qui s'avère également nécessaire pour diminuer l'impact des chaufferies sur leur environnement immédiat généralement fortement urbanisé) et un meilleur usage des calories par la récupération puis la distribution de chaleur à basse température. La condensation des fumées grâce à un échangeur en sortie chaudière permet cet accroissement de rendement.

Ces technologies apparaissent toutefois peu transposables dans les pays tropicaux où en général les besoins de chaleur s'arrêtent à la production de vapeur de process ou de fluide thermique à haute température.

Les industries du bois, de la trituration et les agro-industries sont les utilisateurs traditionnels des technologies de combustion de la biomasse. Pour les industries de première et seconde transformation ainsi que pour les agro-industries, bien souvent la recherche de systèmes optimisés ne s'est pas avérée nécessaire car la ressource disponible sur un site industriel est généralement supérieure aux besoins. Une chaudière peu performante permet ainsi d'incinérer les déchets superflus à bon compte. Toutefois les chaudières ont bénéficié ces dernières années d'améliorations quant au contrôle commande et à l'automatisation.

C'est plutôt dans les industries de la pâte à papier et de la trituration que les évolutions techniques sont les plus sensibles. En effet compte tenu des consommations énergétiques très importants des entreprises de ce secteur, il leur a été nécessaire de développer des moyens de production d'électricité et de cogénération à la mesure de leurs besoins (quelques dizaines de mégawatts) et de la disponibilité en déchets (écorces, liqueurs noires, déchets de bois et de papier...). C'est ainsi qu'ont été développés les systèmes de combustion en lits fluidisés : lit fluidisé simple, lit à recirculation...

Les technologies de combustion de la biomasse devraient toutefois atteindre assez rapidement leurs limites dans le futur. En effet, si jusqu'à maintenant l'évolution des technologies de combustion des combustibles solides était similaire pour le bois, la tourbe ou le charbon, dans le futur on s'achemine vers une différenciation des concepts de base. Les grandes unités utilisant le charbon s'orientent vers la combustion en conditions supercritiques (hautes température et pression) mais pour des puissances de plusieurs centaines de mégawatts. Ces conditions de fonctionnement permettraient d'atteindre des rendements électriques élevés. Pour les installations utilisant de la biomasse, atteindre une taille similaire est difficilement envisageable notamment

car le renchérissement rapide du coût de la matière première est lié à l'augmentation du rayon de collecte de l'approvisionnement.

C'est pourquoi la recherche d'une certaine flexibilité des installations vis-à-vis de la ressource est l'un des thèmes très actuels pour le domaine de la combustion. Ce mouvement qui vise à utiliser pour une même installation du bois (déchet) et du charbon ou des déchets (urbains, industriels ou agricoles) et du charbon ou des mélanges de déchets urbains et industriels a démarré depuis quelques années avec le renchérissement du coût de traitement des déchets et la pression grandissante qui s'exerce pour éliminer les décharges. Cette flexibilité est par ailleurs un avantage important pour les exploitants de centrale énergétiques qui peuvent ainsi mieux gérer les variations de coût de leurs combustibles. Les pays tropicaux ont été parmi les premiers à s'intéresser à ce type d'installations notamment pour la production d'électricité à partir de bagasse durant les saisons de récolte et de charbon en intersaison (*installations de Bois Rouge et du Gol à la Réunion réalisées par Babcock et Gaz de France*).

2.4 - LA THERMOLYSE

Il s'agit de convertir en liquide (produit huileux plus ou moins bitumineux) différentes matières premières cellulosiques. La réaction a lieu en présence d'un catalyseur, sous fortes pressions d'hydrogène (100 à 200 bars) et entre 250 et 300°C. Au niveau réactionnel, les mécanismes mis en oeuvre au niveau de la dégradation de la cellulose sont fondamentalement différents de ceux impliqués dans la pyrolyse (ESNOUF C., 1984).

La liquéfaction de la cellulose sous pression de CO et/ou d'H₂ a été étudiée dans un but énergétique à partir des années 1970 avec des travaux anglo-saxons (APPELL H.R. *et al.*, 1971). Une grande variété de déchets cellulosiques a ainsi été convertie en huile ou en bitume par différents procédés, en fonction des laboratoires, par le moyen d'une réaction générale de réduction utilisant un gaz riche en monoxyde de carbone, de l'eau, des catalyseurs alcalins et sous pression d'au moins 100 bars. La conversion de la cellulose est de 90 à 99 %; elle semble optimum vers 350 °C. La lignine est quant à elle peu touchée. C'est pourquoi l'Université de Berkeley procédait à une préhydrolyse du bois vers 200°C sous 5-10 bars en présence d'un acide très dilué (Université de Berkeley, 1979). La production d'huile, liquide à 100 °C, représente 45 à 50 % en masse du déchet traité et son pouvoir calorifique varie de 30 000 à 33 000 MJ/kg.

Assez rapidement apparus, les obstacles majeurs à l'utilisation de ce procédé sont :

- la qualité des huiles surtout, trop complexes et trop instables pour se prêter aisément à des procédés simples d'amélioration de type coupe pétrolière,
- la nécessité de développer de nouvelles techniques d'ingénierie pour le pompage et le transport des déchets dans un équipement haute pression,
- la production maximale d'huile, avec une consommation minimale de gaz réducteurs et d'énergie pour les besoins du processus.

Devant les écueils rencontrés et la difficile rentabilité économique de tels procédés, les recherches ont assez rapidement été arrêtées dans la plupart des laboratoires.